

**19 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND**



**DEUTSCHES  
PATENTAMT**

**Patentschrift**  
**DE 197 41 329 C 1**

⑤ Int. Cl.<sup>6</sup>:  
**B 23 K 26/00**  
B 23 K 15/02

21	Aktenzeichen:	197 41 329.3-34
22	Anmeldetag:	19. 9. 97
43	Offenlegungstag:	-
45	Veröffentlichungstag der Patenterteilung:	22. 10. 98

**Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden**

⑦③ Patentinhaber:

**Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der  
angewandten Forschung e.V., 80636 München, DE**

⑦④ Vertreter:

Patentanwälte Dr. Sturies Eichler Füssel, 42289  
Wuppertal

⑦② Erfinder:

**Beersiek, Jörg, Dipl.-Phys., 52066 Aachen, DE;  
Schulz, Wolfgang, Dr.rer.nat., 52379 Langerwehe,  
DE**

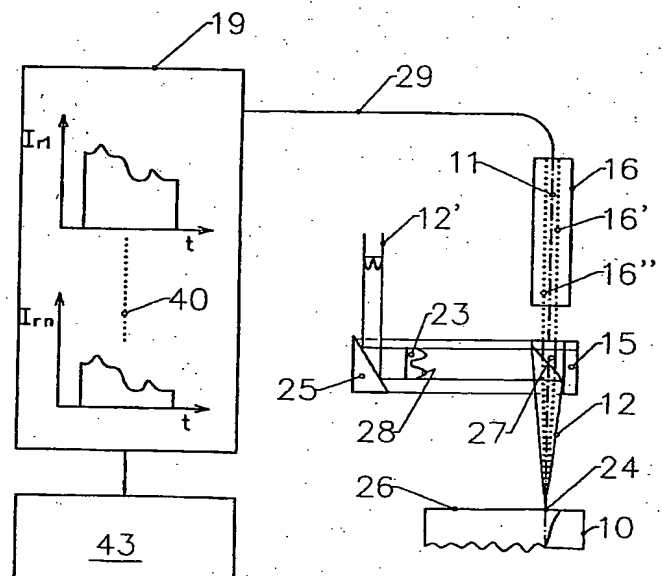
⑤⑥ Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
gezogene Druckschriften:

DE 44 34 409 C1

**(54) Verfahren und Vorrichtung zur Materialbearbeitung mit Plasma induzierender Hochenergiestrahlung**

57 Verfahren zur Materialbearbeitung mit Plasma induzierender Hochenergiestrahlung, insbesondere Laserstrahlung, bei dem der Bereich der Dampfkapillaren (13) des Werkstücks (10) mit einer die gesamte Werkstückdicke erfassenden Tiefenschärfe beobachtet und dabei die Intensität der Plasmastrahlung in Abhängigkeit von der Zeit gemessen wird.

Um die Qualität der Materialbearbeitung hinreichend genau überwachen zu können, wird das Verfahren so durchgeführt, daß momentane Plasmaintensitäten an mindestens zwei Meßstellen parallel zur Achse (11) der induzierten Strahlung (12) gemessen werden, daß die gemessenen Plasmaintensitäten vorbestimmten Kapillargeometriegrößen zugeordnet werden, und daß eine Steuerung der Materialbearbeitung in Abhängigkeit von den Kapillargeometriegrößen erfolgt.



**DE 197 41 329 C 1**

Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren mit den im Oberbegriff des Anspruchs 1 angegebenen Verfahrensschritten.

Die Materialbearbeitung mit Plasma induzierender Hochenergiestrahlung, zum Beispiel mit Laserstrahlung oder mit Elektronenstrahlung, bedarf bei ihrer Anwendung der on-line-Qualitätsüberwachung und der Regelung. Eine Optimierung des Bearbeitungsprozesses ist wünschenswert. Es ist daher seit langem allgemein bekannt, optische und akustische Signale aus dem Bearbeitungsbereich zur Qualitätskontrolle einzusetzen. Beispielsweise kann der Durchschweißgrad, der ein Qualitätsmerkmal für eine vollständige Verschweißung eines Werkstücks sein kann, durch Beobachtung der Unterseite des Werkstücks oder durch seitlich erfolgende Beobachtung des Bearbeitungsbereichs bestimmt werden, wobei zur Beobachtung optische Detektoren eingesetzt werden, die aus den optischen Intensitätswerten Frequenzschwerpunkte bestimmen, mit deren Hilfe auf den Durchschweißgrad zu schließen ist. Beide Methoden sind jedoch indirekt und mit Mängeln behaftet.

Aus der DE 44 34 409 C1 ist ein Verfahren mit den eingangs in Bezug genommenen Verfahrensschritten bekannt, die ein direktes Vorgehen betreffen. Die Beobachtung des Bereichs der Dampfkapillaren des Werkstücks erfolgt in der Achse der induzierenden Laserstrahlung. Aus der Beobachtung der Emission der Plasmastrahlung des gesamten Bereichs der Dampfkapillaren wird ein Mittelwert der Intensität bestimmt und als Maß für die Eindringtiefe verwendet. Dieses Verfahren macht eine Justierung der Meßeinrichtung bezüglich der Achse der Plasma induzierenden Laserstrahlung notwendig. Wegen der Mittelwertbildung sind die Beobachtungsergebnisse entsprechend summarisch, so daß die Beobachtungsgenauigkeit, die davon abhängige Auswertung und die davon wiederum abhängige Steuerung des Prozesses der Materialbearbeitung entsprechend Verbesserungswürdig erscheinen.

Der Erfindung liegt demgegenüber die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren mit den eingangs in Bezug genommenen Verfahrensschritten so zu verbessern, daß eine verbesserte Steuerung der Materialbearbeitung erreicht wird bzw. eine weitergehende Verhinderung von Prozeßfehlern durch verbesserte direkte Prozeßbeobachtungen.

Diese Lösung dieser Aufgabe wird durch die im Kennzeichenteil des Anspruchs 1 aufgeführten Verfahrensschritte erreicht.

Für die Erfindung ist zunächst von Bedeutung, daß von einer Mittelwertbildung bei der Auswertung der Intensitäten der Plasmastrahlung abgewichen wird. Wesentlich ist demgegenüber eine Auswertung momentaner Plasmaintensitäten an mehreren Stellen des Beobachtungsbereichs der Dampfkapillaren. Es hat sich gezeigt, daß die an einer Meßstelle zu beobachtende Plasmaintensität direkt in Bezug zur Ausbildung der Dampfkapillaren steht. Infolgedessen können grundsätzlich durch pikselweise bzw. punktweise Beobachtung des Bearbeitungsbereichs die momentan vorhandene Form der Dampfkapillaren oder zumindest Kenngrößen dieser Form bestimmt werden. Die Messung der Plasmaintensitäten erfolgt punktweise parallel zur Achse der induzierenden Strahlung. Die Form der Dampfkapillaren bzw. deren Kenngrößen, also die im Kennzeichen des Anspruchs 1 erwähnten Kapillargeometriegrößen, lassen einen unmittelbaren Rückschluß auf die Qualität der Bearbeitung zu, weil eine hochqualitative Bearbeitung an der Form der Dampfkapillaren bzw. an den Kapillargeometriegrößen zu erkennen ist. Denn die Kapillargeometriegrößen vorbestimmter Bearbeitungsaufgaben sind für vorbestimmte Be-

arbeitungsqualitäten bekannt. Umgekehrt kann also anhand der gemessenen Kapillargeometriegrößen auf die effektiv vorhandene Bearbeitungsqualität geschlossen werden. Dabei wird eine jeweilige Justierung der Meßeinrichtung zur Achse der induzierenden Strahlung vermieden. Die bei diesem Verfahren gewonnenen Kapillargeometriegrößen werden zur Steuerung der Materialbearbeitung herangezogen. Auf diese Weise ermöglicht eine punktweise Auswertung momentaner Plasmaintensitäten eine zumindest teilweise Darstellung der Kapillaren. Deren Ausbildung bzw. Ausdehnung ist ein Maß für einen Bearbeitungsparameter, wie die Laserstrahlleistung oder die Vorschubgeschwindigkeit, die zur Steuerung der Materialbearbeitung beeinflußt werden.

Die Form einer Abtragsvertiefung bei einer Materialbearbeitung mit Plasma induzierender Hochenergiestrahlung erstreckt sich im wesentlichen in der Richtung der Achse der induzierenden Strahlung bzw. parallel dazu. Das ist im Hinblick auf ein möglichst tiefes Einschweißen in das Werkstück auch erforderlich. Im Hinblick auf ein solches gewünschtes tiefes Einschweißen wird das Verfahren vorteilhafterweise so durchgeführt, daß als Kapillargeometriegrößen eine Kapillartiefe verwendet wird. Die momentane Tiefe der Dampfkapillaren an allen Stellen des Bearbeitungsbereichs hängt direkt mit denjenigen Prozeßparametern zusammen, welche die Qualität der Bearbeitung bestimmen. Beispielsweise ist die Qualität der Bearbeitung schlecht, wenn die Kapillartiefe bei der Bearbeitung eines Werkstücks nicht so groß ist, wie sie bestimmungsgemäß sein soll.

Das Bearbeitungsergebnis kann dadurch vervollkommen werden, daß aus einer Vielzahl von Kapillargeometriegrößen die Form der Dampfkapillaren bestimmt und der Steuerung der Materialbearbeitung zugrunde gelegt wird. Die vollständige Ermittlung der momentanen Form der Dampfkapillaren ermöglicht es, die Qualität der Bearbeitung exakt zu bestimmen. Es erfolgt eine vollständige direkte Beobachtung der momentanen Dampfkapillaren. Beispielsweise können entstehende bzw. entstandene Bearbeitungsfehler direkt beobachtet werden. Als Beispiel wird Schmelzbadauswurf beim Laserstrahlenschweißen von Aluminium genannt. Ein teilweises Verschließen der Dampfkapillaren wird direkt abgebildet und bei richtiger Umsetzung der sich aus der Abbildung ergebenden Geometriedaten kann das Verfahren so gesteuert werden, daß der betreffende Bearbeitungsfehler verhindert wird. Eine derartige Verfahrenssteuerung ist optimal möglich, wenn die Form der Dampfkapillaren insgesamt bestimmt wird. Bei einer nur teilweisen Bestimmung der Form der Dampfkapillaren oder bei einer Bestimmung nur weniger Kapillargeometriegrößen ist eine entsprechend eingeschränkte Verfahrenssteuerung jedoch ebenfalls möglich.

Die Dampfkapillare erstreckt sich in der Achse der induzierenden Strahlung und auch parallel dazu mit unterschiedlichen Kapillartiefen und weist radial zu der genannten Achse bei unterschiedlichen Tiefenerstreckungen unterschiedliche radiale Abmessungen auf. Auch diese können als Kapillargeometriegrößen herangezogen werden, was insbesondere bei vollständiger Bestimmung der Form der Dampfkapillaren optimal möglich ist. Ein vereinfachtes Verfahren ergibt sich jedoch, wenn die Länge der Öffnung der Dampfkapillaren in Vorschubrichtung als Kapillargeometriegröße verwendet wird. Diese Länge der Öffnung der Dampfkapillaren in Vorschubrichtung ist deswegen von Bedeutung, weil sie gemeinsam mit der Kapillartiefe das Aspektverhältnis bestimmt, nämlich das Verhältnis der genannten Länge zur Kapillartiefe. Ein hinreichend großes Aspektverhältnis ermöglicht ein ungehindertes Abströmen

des Dampfes aus der Dampfkapillaren in die Umgebung, wodurch der Prozeß stabilisiert wird. Eine Durchführung des Verfahrens im Hinblick auf eine vorbestimmte Länge der Öffnung der Dampfkapillaren in Vorschubrichtung ermöglicht qualitativ hinreichende Bearbeitungsergebnisse, wenn man davon ausgeht, daß die Einschweißtiefe bei vielen Bearbeitungsaufgaben konstant ist und durch einen vorbestimmten Wert für die Streckenenergie festgelegt werden kann, also durch das Verhältnis von Laserstrahlleistung zu Vorschubgeschwindigkeit. In einem besonderen Fall ist die Länge der Öffnung der Dampfkapillaren in Vorschubrichtung als Kapillargeometriegröße von augenscheinlich besonderer Bedeutung. Denn bei einem Durchschweißen eines Werkstücks wird die Kapillarform augenblicklich erheblich schlanker, weil ein Großteil der eingestrahnten Energie durch die Dampfkapillare hindurchtritt, also nicht mehr zum Aufschmelzen von Werkstoff zur Verfügung steht. Dementsprechend verringert sich die genannte Länge, so daß durch direkte Beobachtung parallel zur Achse der induzierenden Strahlung ein Durchschweißen augenblicklich festgestellt werden kann.

Bei vielen Materialbearbeitungen genügt es, die notwendige Energie zu bestimmen, weil eine Änderung während der Bearbeitung nicht erforderlich ist. Dazu wird die Streckenenergie bestimmt, nämlich das Verhältnis von Laserstrahlleistung zu Vorschubgeschwindigkeit. Die Streckenenergie steht für eine vorbestimmte Einschweißtiefe und diese bzw. die Kapillartiefe nehmen mit wachsender Streckenenergie monoton zu. Häufig brauchen bei derartigen Materialbearbeitungen dynamische Vorgänge im Schweißbereich nicht beachtet zu werden, zumal wenn ein ausreichendes Aspektverhältnis vorliegt, welches ein unbehindertes Abströmen des Dampfes aus der Kapillaren ermöglicht. Schweißfehler, zum Beispiel Poren, treten bei solchen Verfahren üblicherweise nicht auf. Falls jedoch kompliziertere Schweißaufgaben erfüllt werden müssen, wie zum Beispiel beim Schweißen von Konturen, müssen die Verfahrensparameter während der Materialbearbeitung gesteuert werden. Bei dieser Steuerung erfolgt üblicherweise eine Änderung der Laserstrahlleistung und/oder der Vorschubgeschwindigkeit. Es hat sich nun bei dem erfindungsgemäßen Verfahren mit parallel zur Achse der induzierenden Strahlung erfolgenden Messungen der momentanen Plasmaintensitäten ergeben, daß durch die kombinierte zeitaufgelöste Beobachtung der Position der Dampfkapillaren und deren Ausdehnung eine getrennte Überwachung der Vorschubgeschwindigkeit und der Laserstrahlleistung ermöglicht wird. Denn die Länge der Öffnung der Dampfkapillaren in Vorschubrichtung und die Kapillartiefe wachsen beide monoton im gleichen Sinne mit monoton wachsender Laserstrahlleistung. Das ist bei der Vorschubgeschwindigkeit nicht der Fall. Bei monoton wachsender Vorschubgeschwindigkeit wächst zwar die Kapillarlänge monoton, die Einschweißtiefe bzw. die Kapillartiefe ist jedoch monoton fallend.

Aufgrund der vorstehenden Erkenntnisse kann das Verfahren so durchgeführt werden, daß die Laserstrahlleistung in Abhängigkeit von einer sich gleichsinnig mit der Kapillartiefe ändernden Länge der Öffnung der Dampfkapillaren geregelt wird.

Außerdem kann das Verfahren so durchgeführt werden, daß die Vorschubgeschwindigkeit in Abhängigkeit von einer sich gegenseitig mit der Kapillartiefe ändernden Länge der Öffnung der Dampfkapillaren geregelt wird.

In beiden vorgenannten Verfahrensfällen ist es nicht notwendig, daß die Verfahrensparameter der Laserstrahlleistung bzw. der Vorschubgeschwindigkeit für die Materialbearbeitung vorbestimmt sein müssen. Sie können vielmehr während der Bearbeitung bestimmt werden.

Die beiden vorbeschriebenen Verfahrensmöglichkeiten müssen nicht gleichzeitig genutzt werden. Beispielsweise kann eine Steuerung der Laserstrahlleistung bei fester Vorschubgeschwindigkeit ausreichen, wenn nur ein bestimmter Bereich der Kapillarlänge und der Kapillartiefe eingehalten werden soll, nicht jedoch feste Werte der Kapillarlänge und der Kapillartiefe.

Für die Materialbearbeitung ist jedoch nicht nur die Länge der Öffnung der Dampfkapillaren in Vorschubrichtung von Bedeutung, also die Kapillarlänge, sondern auch die Breite der Öffnung der Dampfkapillaren quer zur Vorschubrichtung, also die Kapillarb Breite. Wird die Kapillarb Breite beispielsweise zu klein, muß eine geeignete Steuerung der Materialbearbeitung erfolgen. Das Verfahren kann also auch so durchgeführt werden, daß die Breite der Öffnung der Dampfkapillaren quer zur Vorschubrichtung als Kapillargeometriegröße verwendet wird.

Die Erfindung bezieht sich desweiteren auch auf eine Vorrichtung zur Materialbearbeitung mit Plasma induzierender Hochenergiestrahlung mit den im Oberbegriff des Anspruchs 8 aufgeführten Merkmalen. Bezüglich dieser Vorrichtung liegt der Erfindung die Aufgabe zugrunde, sie so zu verbessern, daß die Steuerung der Materialbearbeitung im Sinne einer weitergehenden Verhinderung von Prozeßfehlern durch verbesserte direkte Prozeßbeobachtungen mit verbesserten Steuerungsmitteln durchgeführt werden kann.

Diese Aufgabe wird durch die im Kennzeichenteil des Anspruchs 8 aufgeführten Merkmale gelöst.

Bei der vorbeschriebenen Vorrichtung wird eine zur Laserstrahlachse koaxiale Beobachtung genutzt. Die optische Achse dieser Beobachtung entspricht zwar der Laserstrahlachse, die faktische Beobachtung der momentanen Intensitäten des Bearbeitungsbereichs erfolgt jedoch in jedem Fall neben dieser optischen Laserstrahlachse. Infolge dieser seitlich erfolgenden Beobachtung bzw. Messung kann grundsätzlich auch die größte Kapillartiefe erfaßt werden, die sich in der Regel nicht an der Position der Laserstrahlachse befindet, sondern auf die Vorschubrichtung bezogen dahinter. Dabei wird eine jeweilige Justierung der Detektoren in der Achse der induzierenden Strahlung vermieden.

Eine sehr einfache Ausgestaltung der Vorrichtung liegt vor, wenn die Detektoren von Lochblenden gebildet sind. Mittels lediglich zweier Lochblenden kann ein Prozeßzustand erfaßt werden, da jede Lochblende lediglich einen Punktbereich der Wechselwirkungszone der Bearbeitung bzw. der Dampfkapillaren beobachtet bzw. mißt.

Die Vorrichtung kann vorteilhafterweise so ausgebildet werden, daß eine erste Lochblende in Vorschubrichtung und eine zweite Lochblende quer zur Vorschubrichtung jeweils außerhalb der Achse der induzierenden Strahlung angeordnet ist. Das Unterschreiten bestimmter Intensitätswerte der Plasmastrahlung kann die Steuerung der Materialbearbeitung beeinflussen.

Eine verbesserte Erfassung der Ausbildung der Dampfkapillaren wird erreicht, wenn mindestens eine den Bereich der Dampfkapillaren überdeckende Zeilenkamera vorhanden ist. Eine Zeilenkamera besitzt eine Vielzahl von Detektoren, die in einer Zeile angeordnet sind. Dementsprechend wird eine Zeilenkamera vorteilhafterweise in Vorschubrichtung und/oder quer zur Vorschubrichtung oberhalb des Bearbeitungsbereichs des Werkstücks angeordnet. Die mit der Zeilenkamera außerhalb der optischen Achse und parallel dazu erfolgende Beobachtung liefert eine Vielzahl von Meßwerten, wobei die Vielzahl durch die Anzahl der Detektoren der Zeilenkamera bestimmt ist.

Eine weiter verbesserte Beobachtung der Bearbeitung bzw. der Dampfkapillaren läßt sich mit einer Vorrichtung erreichen, bei der ein den gesamten Bereich der Dampfkapil-

laren abbildender und in einzeln auswertbare Meßpunkte auflösender Bildgeber vorhanden ist. Die Genauigkeit des Meßergebnisses hängt von der Anzahl der auswertbaren Meßpunkte ab, also von der Anzahl der in der Fläche angeordneten Detektoren, die der Bildgeber aufweist.

Insbesondere kann die Vorrichtung so ausgestaltet werden, daß als Bildgeber eine CCD-Kamera, ein Fotodioden- oder ein Fotomultiplier-Array vorhanden ist. Die vorgenannten Bildgeber sind für die optische Überwachung bei der Materialbearbeitung mit Plasma induzierender Hochenergiestrahlung bewährt und ermöglichen die für sie bekannten Einsatzverfahren, wie Taktsteuerung der Bildüberwachung und automatische Intensitätsanpassungen.

Die Erfindung wird anhand der Zeichnungen erläutert. Es zeigt:

Fig. 1 eine schematische Darstellung einer Vorrichtung zur Beobachtung eines Werkstücks beim Bearbeiten mit Laserstrahlung,

Fig. 2 einen Schnitt durch eine Dampfkapillare bei einer Einschweißung,

Fig. 3 einen Schnitt durch eine Dampfkapillare bei einer Durchschweißung,

Fig. 4 die Abhängigkeit der Kapillarlänge und der Kapillartiefe von der Vorschubgeschwindigkeit und

Fig. 5 die Abhängigkeit der Kapillarlänge und der Kapillartiefe von der Laserstrahlleistung.

Fig. 1 zeigt schematisch ein Werkstück 10, das mit fokussierter Laserstrahlung 12 bearbeitet wird. Als Materialbearbeitung kommt, je nach Einsatz des verwendeten Lasers, ein Schweißen, Schneiden, Bohren, Abtragen oder Umschmelzen in Frage. Die vom nicht dargestellten Laser abgegebene Laserstrahlung 12' wird mittels eines Umlenkspiegels 25 auf einen Fokussierspiegel 15 gelenkt, der die Laserstrahlung 12 auf das Werkstück 10 fokussiert. Der Fokus 24 liegt beispielsweise auf der Werkstückoberfläche 26. Als Fokussierspiegel 15 wird ein Lochspiegel eingesetzt, dessen Loch 27 innerhalb des Ringmaximums 28 der einen Ringmode 23 aufweisenden Laserstrahlung 12 angeordnet ist. Das Loch 27 läßt Freiraum für die Beobachtung der Werkstückoberfläche 26 im Bereich des Fokus 24 des Werkstücks 10. Zur Beobachtung des Bearbeitungsbereichs der Werkstückoberfläche 26 wird eine Meßeinrichtung 16 eingesetzt, die in Fig. 1 lediglich schematisch dargestellt ist. Beispielsweise werden zwei Detektoren 16', 16'' in Form von Lochblenden eingesetzt. Fig. 1 zeigt diese Detektoren 16', 16'' nicht im Detail, sondern lediglich bezüglich ihrer Meßrichtung. Danach erfolgt die Messung nicht in der Achse 11 der Plasma induzierenden Laserstrahlung, sondern im Abstand parallel dazu. Die bei der Bearbeitung beobachteten Meßwerte bzw. das von der Meßeinrichtung erfaßte Licht wird über eine Leitung 29 z. B. einen Lichtleiter im Falle einer Bearbeitung mit Nd: YAG-Laser, an eine Auswerteeinheit 19 weitergeleitet. Die Auswerteeinheit 19 zeigt, daß die Intensität  $I$  der Plasmastrahlung in Abhängigkeit von der Zeit  $t$  erfaßt wird. Die Erfassung erfolgt mehrfach, nämlich an den durch die Detektoren 16', 16'' bestimmten Stellen. Demgemäß erfolgt eine punktweise Erfassung des Bearbeitungsbereichs. In der Auswerteeinheit 19 ist daher die Abhängigkeit  $I_1(t)$  erfaßt und dargestellt, also für einen ersten Meßpunkt  $r_1$ . Darunter befindet sich eine weitere Darstellung  $I_m(t)$ . Hierdurch wird veranschaulicht, daß an einem weiteren Meßpunkt  $m$  eine Erfassung der Intensität der Plasmastrahlung in Abhängigkeit von der Zeit  $t$  erfolgt. Die Anordnung der Meßpunkte  $r_1, r_2$  bis  $m$  erfolgt zweckgemäß entsprechend der Bearbeitungsaufgabe. Die Punktreihe 40 symbolisiert, daß eine Vielzahl von Meßpunkten verwendet werden kann, je nach eingesetzter Meßeinrichtung 16. Die Meßeinrichtung 16 kann als Detektoren Lochblenden aufweisen, sie kann

aber auch als beliebiges zweckmäßiges meßwertgebendes oder bildgebendes Element ausgebildet sein, wie beispielsweise als Zeilenkamera, als CCD-Kamera, als Fotodioden- oder Fotomultiplier-Array. Entsprechend der jeweiligen Ausbildung der meßpunkteauswertenden Meßeinrichtung ergeben sich entsprechend vielzählige Meßpunkte, die ausgewertet werden können.

Die Auswerteeinheit 19 ist an eine Steuereinrichtung 43 angeschlossen, die von der Auswerteeinheit 19 gelieferte Daten verarbeitet. Die gelieferten Daten betreffen Kapillargeometriegrößen, welche von der Auswerteeinheit 19 aufgrund ihr vorgegebener Bezugswerte berechnet wurden, nämlich aufgrund von für die Bearbeitungsaufgabe bekannten Kapillargeometriegrößen.

Es hat sich gezeigt, daß mit meßpunktegebenden bzw. bildgebenden Verfahren die Form der Dampfkapillaren bzw. die Form der Abtragsvertiefung des Bearbeitungsbereichs mehr oder weniger präzise erfaßt werden kann. Fig. 2 zeigt eine dreidimensionale Darstellung einer Dampfkapillare bei einer Einschweißung in ein Werkstück im Längsschnitt. Dabei ist die angegebene Länge in Vorschubrichtung zu sehen, die angegebene Breite quer zu der Vorschubrichtung. Die Kapillartiefe  $d_k$  bzw. die Einschweißtiefe ist in der Meßrichtung 42 unterschiedlich, je nach den physikalisch bedingten Ausbildungen der Wechselwirkungszone. Die dargestellte vollständige Abbildung der Dampfkapillaren ist nur dann möglich, wenn eine hinreichend genaue Beobachtung des gesamten Bearbeitungsbereichs erfolgt, also eine Beobachtung mit hinreichend vielen Meßpunkten. Es ist dann beispielsweise ersichtlich, daß der Scheitel 41 der Dampfkapillaren Abstand zur Strahlachse bzw. zur optischen Achse 42 hat. Das ist durch den relativen Vorschub der Laserstrahlung 12 und die sich in der Dampfkapillare einstellenden dynamischen Vorgänge bedingt.

Die Kapillartiefen, die Längen und die Breiten der Dampfkapillaren sind als Kapillargeometriegrößen anzusehen, welche die Form der Dampfkapillaren vollständig beschreiben können. Sie können sämtlich mit Hilfe einer punktweise erfolgenden Beobachtung parallel zur optischen Achse 42 erfaßt werden, und zwar zeitgenau entsprechend der Auslegung der Meßeinrichtung. Es ist jedoch auch eine weniger vollständige Erfassung der Form der Dampfkapillaren ausreichend, nämlich anhand ausgewählter Kapillargeometriegrößen, wie der maximalen Kapillartiefe  $d_k$ , der Kapillarlänge  $L$ , also der Länge der Öffnung der Dampfkapillaren in Vorschubrichtung durch die Meßachse 42, und der Breite  $B$  der Öffnung der Dampfkapillaren 13 quer zur Vorschubrichtung, gemessen durch die Meßachse 42. Die vorgenannten Kapillargeometriegrößen  $d_k, L$  und  $B$  bzw.  $B/2$  sind in der Fig. 2 dargestellt.

Fig. 3 zeigt eine Ausbildung der Dampfkapillaren 13, die von der Ausbildung der Fig. 2 abweicht. Der Grund ist die Durchschweißung des Werkstücks, so daß das Werkstück in Einstrahlrichtung zumindest teilweise durchgängig ist. Ein Teil der Laserstrahlung wird daher durch das Werkstück hindurchgestrahlt und steht nicht zur Einkopplung und damit zum Aufschmelzen des Werkstoffs zur Verfügung. Infolgedessen ist die Dampfkapillare 13 sehr viel schlanker. Die Länge  $L_1$  ist daher kleiner, als die damit zu vergleichende Kapillarlänge  $L$ . Entsprechend ist auch die Breite  $B_1/2$  kleiner. Es ergibt sich, daß beim Laserstrahlschweißen anhand der Ausdehnung der Dampfkapillaren zumindest in Bearbeitungsrichtung der Unterschied zwischen Einschweißung und Durchschweißung ermittelt werden kann, wie der Vergleich der Fig. 2, 3 ergibt.

Bei der Anwendung von Hochenergiestrahlung, insbesondere von Laserstrahlung, führen geringe Abweichungen der Verfahrensparameter zu erheblichen Änderungen des

Bearbeitungsergebnisses. Geringfügige Änderungen von Laserstrahlleistung, Vorschubgeschwindigkeit, Fokusposition usw. können also die Einschweißtiefe und damit die Kapillartiefe, die Fügestruktur und die Stabilität des Prozesses beeinflussen. Deswegen ist die direkte Beobachtung des Fertigungsprozesses bei der Materialbearbeitung von Bedeutung. Die Bearbeitungsparameter sowie sich frei einstellende Prozeßparameter können überwacht werden. Über das bereits angesprochene Ermitteln einer Durchschweißung hinaus, können mit dem Verfahren auch bei der Materialbearbeitung entstehende Bearbeitungsfehler direkt beobachtet werden, zum Beispiel der Schmelzbadauswurf beim Laserstrahlschweißen von Aluminium und das teilweise Verschließen der Abtragsvertiefung. Bei richtiger Umsetzung der Kapillargeometrie Größen können die Bearbeitungsparameter so gesteuert bzw. geregelt werden, daß Bearbeitungsfehler vermieden werden.

Es wurde dargelegt, daß die zeitaufgelöste Erfassung der Geometrie bzw. der Form der Dampfkapillaren möglich ist. Durch die Zeitauflösung lassen sich charakteristische Frequenzen ableiten, die die natürliche Bewegung der Dampfkapillaren anzeigen. Eine geeignete Bewertung dieser Bewegungen bzw. der wechselnden Formen der Dampfkapillaren können zu einer Stabilisierung der Verfahrensparameter benutzt werden, so daß eine Stabilisierung der Wechselwirkungszone bzw. der Dampfkapillaren erfolgt. Dadurch erfolgt der Abtrag gleichmäßig ohne Schweißfehler, wie beispielsweise Poren. Die Stabilisierung der Abtragung verhindert, daß die Dynamik der Gasphase auf das Schmelzbad übertragen wird und so Schwankungen in der Schmelze erzeugt werden, die zu Prozeßfehlern führen können.

Es wurde bereits darauf hingewiesen, daß die Form der Dampfkapillaren von den Bearbeitungsparametern abhängig ist, im wesentlichen von der Laserstrahlleistung und der Vorschubgeschwindigkeit. Dementsprechend kann die Form der Dampfkapillaren auch als Maß für diese Bearbeitungsparameter angesehen und zu deren Steuerung ausgewertet werden.

Dabei ist davon auszugehen, daß die Laserstrahlleistung und die Vorschubgeschwindigkeit unterschiedlich auf die Ausbildung der Dampfkapillaren wirken. Zur Erläuterung wird davon ausgegangen, daß die Laserstrahlleistung und die Vorschubgeschwindigkeit den Begriff der Streckenenergie prägen. Die Streckenenergie ist das Verhältnis der Laserstrahlleistung  $P_L$  zur Vorschubgeschwindigkeit  $v$ . Mit anwachsender Streckenenergie nimmt die Kapillartiefe monoton zu. Bei vielen Materialbearbeitungen ist es ausreichend, die Streckenenergie auf die Bearbeitungsaufgabe abzustimmen. Vielfach kann es jedoch vorteilhaft sein, die dynamischen Effekte der natürlichen Reaktion der Abtragsvertiefung bzw. der Dampfkapillaren zu berücksichtigen. Für das dynamische Verhalten der Dampfkapillaren ist das Aspektverhältnis von Bedeutung, das sich aus der Länge  $L$  der Kapillaröffnung in Vorschubrichtung, also der Kapillarlänge, und der Tiefe  $d_K$  der Dampfkapillaren ergibt. Insoweit gilt also  $A = L/d_K$ . Ein großes Aspektverhältnis  $A$  ermöglicht ein ungehindertes Abströmen des Dampfes aus der Kapillare in die Umgebung, wodurch der Prozeß stabilisiert wird.

In den Fig. 4, 5 wird die Abhängigkeit der Kapillarlänge  $L$  und der Kapillartiefe  $d_K$  von der Vorschubgeschwindigkeit  $v$  einerseits und der Laserstrahlleistung  $P_L$  andererseits dargestellt. Es zeigt sich, daß die Kapillarlänge  $L$  mit  $v$  monoton wächst, während die Kapillartiefe  $d_K$  mit wachsender Vorschubgeschwindigkeit  $v$  monoton fällt. Anders verhält es sich mit der Laserstrahlleistung  $P_L$ . Deren Anwachsen führt zu größerer Kapillarlänge  $L$ , jedoch auch zu einem Anwachsen der Kapillartiefe  $d_K$ .

Nun kann die Kapillarlänge  $L$  der Kapillaröffnung meß-

technisch bestimmt werden. Sie hängt nicht von der Streckenenergie  $P_L/v$  ab, sondern wächst monoton mit der Leistung  $P_L$  und der Vorschubgeschwindigkeit  $v$ . Das Aspektverhältnis  $A = L/d_K$  kann bestimmt werden.

Die Steuerung der Laserstrahlleistung  $P_L$  und der Vorschubgeschwindigkeit  $v$  kann so erfolgen, daß zugleich eine gewünschte Kapillartiefe  $d_K$  und ein für eine stabile Schweißung notwendiges Aspektverhältnis  $A$  eingestellt werden. Der Wert der Kapillartiefe  $d_K$  wird durch die Streckenenergie  $P_L/v$  bestimmt. Das Aspektverhältnis  $A$  wird durch die Laserstrahlleistung  $P_L$  oder die Vorschubgeschwindigkeit  $v$  selbst bestimmt. Bei einer Steuerung oder Regelung der Materialbearbeitung müssen die Verfahrensparameter  $P_L$  und  $v$  nicht vorbestimmt sein sondern können in vorteilhafter Weise während der Bearbeitung bestimmt werden. Die Bestimmung der Laserstrahlleistung  $P_L$  und der Vorschubgeschwindigkeit  $v$  während der Bearbeitung erfordert nicht die Kenntnis von vorbestimmten Abhängigkeiten  $P_L = P_L(L, d_K)$  und  $v = v(L, d_K)$ . Das monotone Verhalten der Kapillargeometrie Größen  $L$  und  $d_K$  in Bezug auf  $P_L$  und  $v$  reicht aus, um eine Regelung der Verfahrensparameter  $P_L, v$  zu realisieren.

Die Kapillarlänge  $L$  ist eine Funktion der lokalen Tiefe. Also ist auch das die Stabilität der Bearbeitung bestimmende Aspektverhältnis  $A = A(Z_0) = L(Z_0/d_K)$  eine Funktion der lokalen Tiefe  $Z_0$ . Die Wahl der Tiefe  $Z_0$ , in der das Aspektverhältnis bestimmt wird, hängt von der jeweiligen Materialbearbeitungsaufgabe ab.

Falls nicht definierte Werte für die Kapillargeometrie Größen  $L$  und  $d_K$  erzielt werden müssen, weil es für das Bearbeitungsergebnis ausreicht, einen vorbestimmten Bereich dieser Größen einzuhalten, kann eine Steuerung der Materialbearbeitung mit der Laserstrahlleistung  $P_L$  bei fester Vorschubgeschwindigkeit  $v$  ausreichen.

Für das Ergebnis der Materialbearbeitung ist es von Bedeutung, daß auch die Kapillarbrite  $B$  einen Minimalwert nicht unterschreitet. Außer der Kapillarlänge  $L$  muß daher auch die Kapillarlänge  $B$  meßtechnisch erfaßt werden. Diejenige Kapillargeometrie Größe  $L$  oder  $B$ , die zuerst kritisch wird, bestimmt den möglichen Bereich der Laserstrahlleistung  $P_L$  und der Vorschubgeschwindigkeit  $v$ , in dem ein stabiler Schweißvorgang ablaufen kann. Durch Messung der Kapillarbrite  $B$  und der Kapillarlänge  $L$  kann entschieden werden, welche Größe zuerst kritisch wird. Wird  $B$  instabil, muß die Laserstrahlleistung  $P_L$  reduziert werden.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zur Materialbearbeitung mit Plasma induzierender Hochenergiestrahlung, insbesondere Laserstrahlung, bei dem der Bereich der Dampfkapillaren (13) des Werkstücks (10) mit einer die gesamte Werkstückdicke erfassenden Tiefenschärfe beobachtet und dabei die Intensität der Plasmastrahlung in Abhängigkeit von der Zeit gemessen wird, dadurch gekennzeichnet, daß momentane Plasmaintensitäten an mindestens zwei Meßstellen parallel zur Achse (11) der induzierenden Strahlung (12) gemessen werden, daß die gemessenen Plasmaintensitäten vorbestimmten Kapillargeometrie Größen zugeordnet werden, und daß eine Steuerung der Materialbearbeitung in Abhängigkeit von den Kapillargeometrie Größen erfolgt.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß als Kapillargeometrie Größen eine Kapillartiefe ( $d_K$ ) verwendet wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß aus einer Vielzahl von Kapillargeometrie Größen die Form der Dampfkapillaren (13) be-

stimmt und der Steuerung der Materialbearbeitung zugrunde gelegt wird.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Länge (L) der Öffnung der Dampfkapillaren (13) in Vorschubrichtung als Kapillargeometriegröße verwendet wird. 5

5. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Laserstrahlleistung ( $P_L$ ) in Abhängigkeit von einer sich gleichsinnig mit der Kapillartiefe ( $d_k$ ) ändernden Länge (L) der Öffnung der Dampfkapillaren (13) geregelt wird. 10

6. Verfahren nach Anspruch 4 oder 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Vorschubgeschwindigkeit (v) in Abhängigkeit von einer sich gegensinnig zu der Kapillartiefe ( $d_k$ ) ändernden Länge (L) der Öffnung der Dampfkapillaren (13) geregelt wird. 15

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Breite (B) der Öffnung der Dampfkapillaren (13) quer zur Vorschubrichtung als Kapillargeometriegröße verwendet wird. 20

8. Vorrichtung zur Materialbearbeitung mit Plasma-induzierender Hochenergiestrahlung, insbesondere Laserstrahlung, die mit Fokussiermitteln auf ein Werkstück (10) fokussiert ist, mit einer den Bereich einer Dampfkapillaren (13) des Werkstücks (10) mittels einer die gesamte Werkstückdicke erfassenden Tiefenschärfe beobachtenden Meßeinrichtung (16), die Intensitäten der Plasmastrahlung in Abhängigkeit von der Zeit mißt, und mit einer an die Meßeinrichtung (16) angeschlossenen Auswerteeinheit, die die gemessenen Strahlungsintensitäten in Relation zu vorbestimmten Bezugswerten auswertet, zur Durchführung eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß mit mindestens zwei parallel zur Achse (11) der induzierenden Strahlung (12) messenden Detektoren (16', 16'') momentane Plasmaintensitäten meßbar sind, die vorbestimmten Kapillargeometriegrößen zuzuordnen sind, in deren Abhängigkeit die Steuerung der Materialbearbeitung beaufschlagt ist. 25 30 35

9. Vorrichtung nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß die Detektoren (16', 16'') Lochblenden sind. 40

10. Vorrichtung nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß eine erste Lochblende in Vorschubrichtung und eine zweite Lochblende quer zur Vorschubrichtung jeweils außerhalb der Achse (11) der induzierenden Strahlung (12) angeordnet ist. 45

11. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 8 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß mindestens eine den Bereich der Dampfkapillaren (13) überdeckende Zeilenkamera vorhanden ist. 50

12. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 8 bis 11, dadurch gekennzeichnet, daß ein den gesamten Bereich der Dampfkapillaren (13) abbildender und in einzeln auswertbare Meßpunkte auflösender Bildgeber vorhanden ist. 55

13. Vorrichtung nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, daß als Bildgeber eine CCD-Kamera, ein Fotodioden- oder ein Fotomultiplier-Array vorhanden ist. 60

---

Hierzu 4 Seite(n) Zeichnungen

---

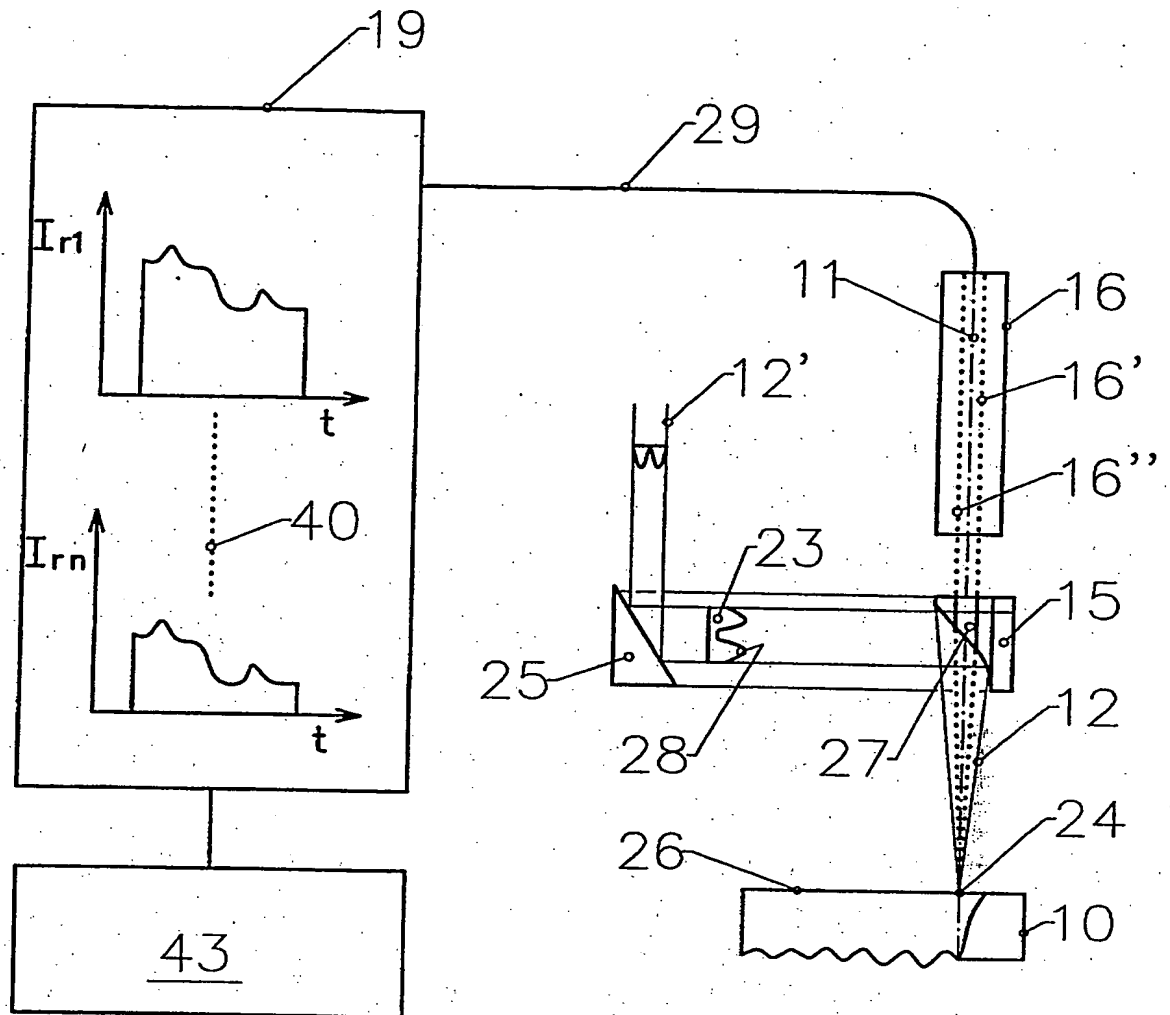


Fig.1

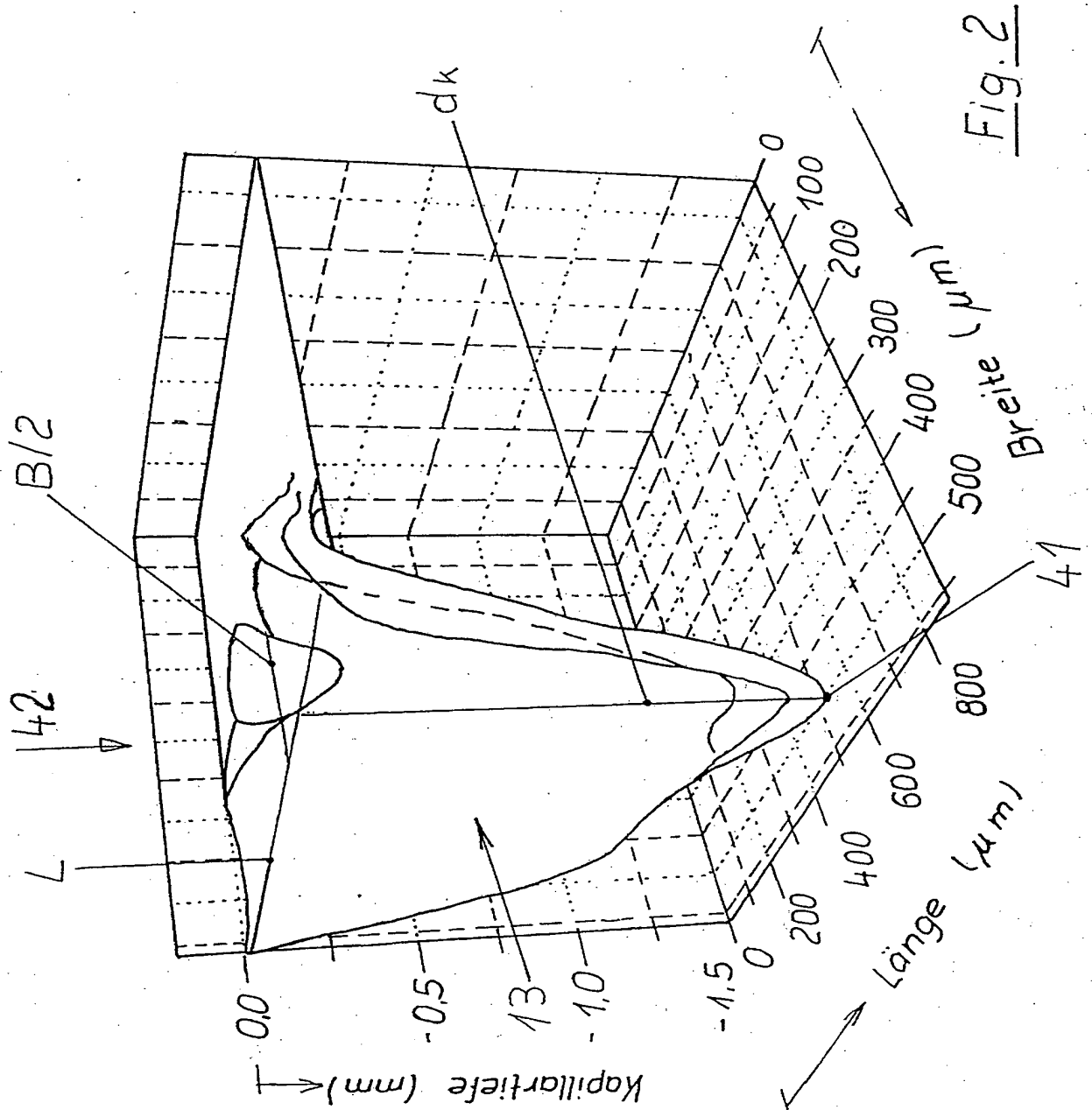




Fig. 3

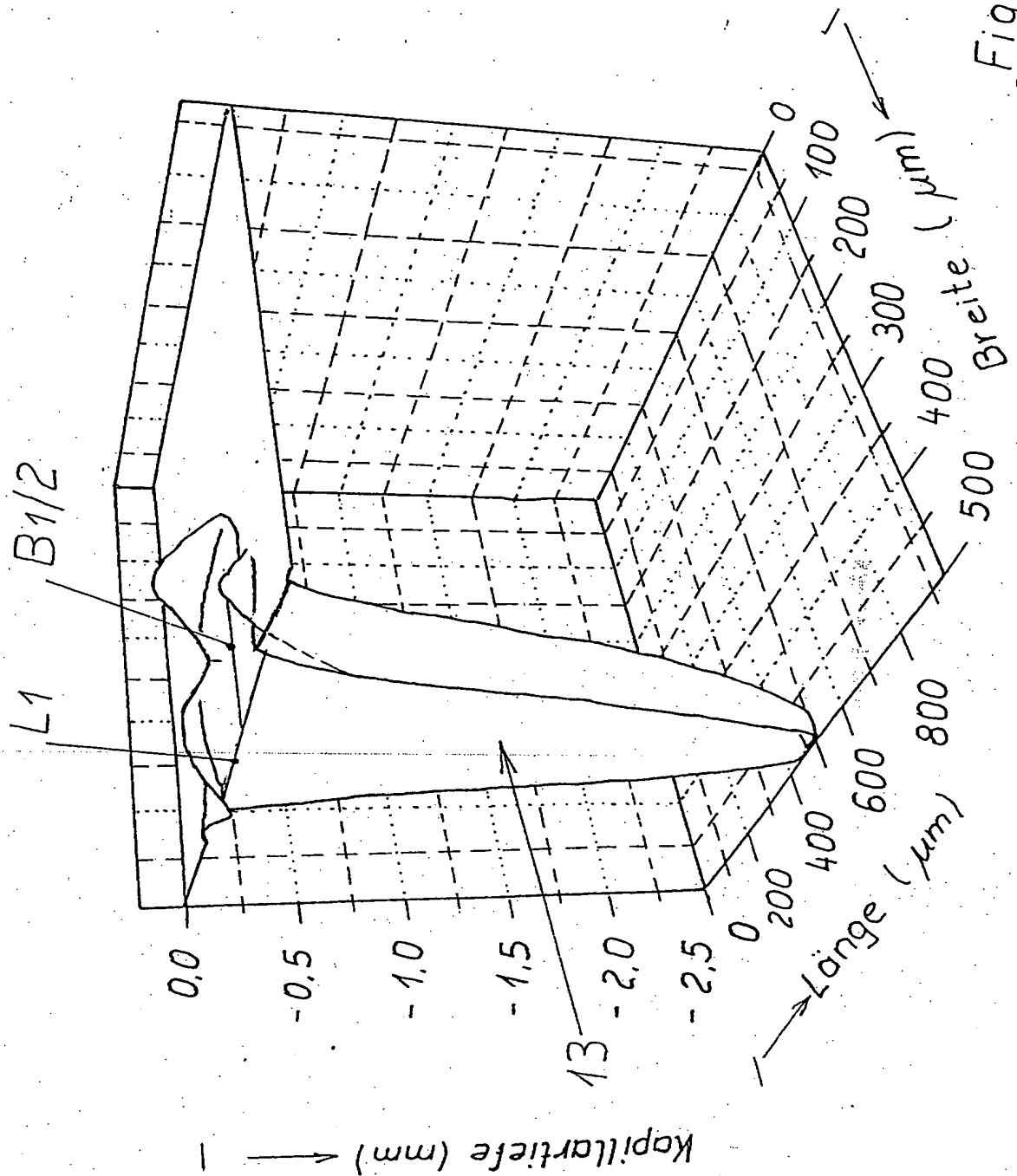


Fig.4

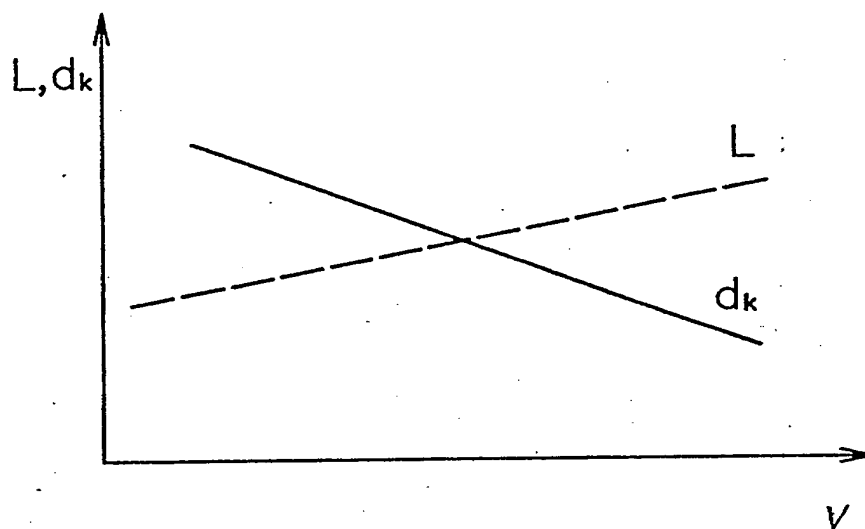


Fig.5

